УДК 621.387.35

ВЛИЯНИЕ КОНФИГУРАЦИИ ЭЛЕКТРОДОВ ВАКУУМНЫХ РАЗРЯДНИКОВ НА ИХ ЭРОЗИЮ

В.А. Лавринович

Томский политехнический университет
E-mail: tevn@hvd.tpu.ru

Исследовано влияние конфигурации электродов вакуумных разрядников (остаточное давление менее 10^{-4} Па) на их эрозионную стойкость. Сравнительные испытания всех геометрий электродных узлов проводились на макетах вакуумных разрядников. Импульс коммутируемого тока имел форму затухающей синусоиды с периодом 640 мкс, декрементом затухания 1,8 амплитудой 55 кА при зарядном напряжении 6,6 кВ. Общая индуктивность контура, измеренная методом короткого замыкания, составила 8,4 мкГн. Приведены фотографии электродов после испытаний разрядников. Показано преимущество стержневой системы электродов перед остальными испытанными конструкциями с точки зрения эрозии электродов. Наиболее слабым местом во всех конструкциях оказался узел поджига, который запылялся продуктами эрозии. Продемонстрировано, что резкое изменение скорости эрозии электродов вакуумных разрядников наступает после превышения коммутируемого тока 10 кА. Полученные данные могут служить основой для разработки вакуумных разрядников отпаянной конструкции серийного производства.

Внедрение электрофизических технологий в производство требует создания надежных и долговечных устройств, выпускаемых серийно. Многие технологические устройства имеют в своем составе коммутатор, который определяет основные параметры установки по напряжению, току и мощности. Для коммутации токов 50...500 кА при напряжении от единиц до 100 кВ с пропускной способностью по количеству электричества за одно срабатывание до 300 Кл и более перспективны вакуумные разрядники (давление остаточных газов порядка 10^{-4} Па и менее). Их включение осуществляется подачей на пусковой электрод импульса напряжения амплитудой 4...5 кВ. Плазма вакуумной дуги в парах металла способна пропустить большие токи между основными электродами. При этом падение напряжения на дуге сравнительно невелико и составляет от десятков до сотни вольт (увеличивается с ростом тока). Вакуумная дуга сохраняет проводимость до тех пор, пока ток не снизится до некоторого критического значения, близкого к единицам ампер (определяется условиями ее горения в вакууме) и зависит от материала электродов. Вакуумный промежуток характеризуется высокой скоростью восстановления электрической прочности в результате быстрой деионизации плазмы и сорбции металлического пара на электродах и стенках камеры разрядника.

Один из главных параметров коммутатора – ресурс по числу срабатываний, который для ваккуумных разрядников определяется эрозией электродов. В результате эрозии запыляются все элементы внутренней полости разрядника. Запыление диэлектрика узла поджига ведет к потере управления, а запыление экранов может привести к снижению выдерживаемого напряжения разрядником из-за отшелушивания продуктов эрозии.

На скорость эрозии электродов разрядника влияют их материал и геометрия. Для токов до 10 кА проблема эрозии решается за счет увеличения площади электродов, на которых горит вакуумная дуга. При токах более 10 кА происходят изменения в характере горения вакуумной дуги (в основном за счет ее контрагирования) и возникают проблемы, которые не решаются простым увеличением площади электродов [1]. Применение эрозионостойких материалов (вольфрам, молибден, композиции медьхром) решает эту проблему только до определенных значений токов. Дальнейшего увеличения эрозионной стойкости электродов и увеличения коммутационного ресурса можно достичь применением специальной геометрии электродов или наложением магнитных полей, которые бы способствовали перемещению дуги по поверхности электродов или поддержанию ее в диффузном виде.

Например, перемещение дуги по электродам разрядника может существенно снизить эрозию электродов за счет сокращения времени взаимодействия дуги с материалом электрода. Создание диффузного разряда способствует существенному снижению эрозии электродов [1].

В связи с этим, была поставлена задача: исследовать влияние геометрии электродов вакуумных разрядников на их эрозионную стойкость. Электроды помещались в автономную отпаянную вакуумную камеру из алюмооксидной керамики, которая обрабатывалась по серийной вакуумно-термической технологии для вакуумных дугогасительных камер. Исследованные конструкции могли служить прототипом вакуумных разрядников отпаянной конструкции, которые можно выпускать по существующим серийным технологиям.

Для исследований было разработано несколько типов электродных систем разрядника, конструктивные схемы которых приведены на рис. 1. Электроды простой торцевой формы рис. 1, *а*, использовались как исходные образцы для сопоставления результатов различных конструкций. Применение "лепесткового контакта" (рис. 1, *б*) позволяет после инициирования дуги в центре перемещать дугу в радиальном направлении под действием собственного магнитного поля от протекающего тока. Прорези в диске контакта выполнены в виде спирали, чтобы увеличить длину пути, по которому движется дуга. Форма прорезей такова, что ток создает магнитное поле, которое двигает дугу в направлении вдоль "лепестка".

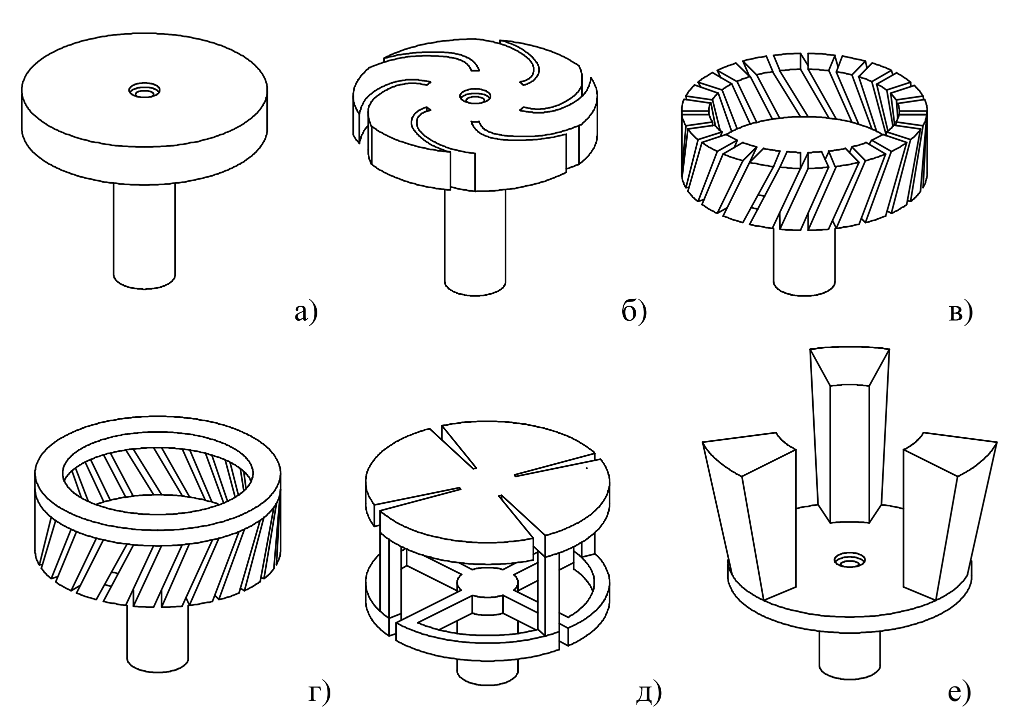


Рис. 1. *Конструктивные схемы испытанных электродов: а) простой торцевой, б) лепесткового типа, в) чашеобразный, г) чашеобразный с накладкой, д) с продольным магнитным полем, е) стержневого типа*

Чашеобразный электрод (рис. 1, *в*) за счет наклонных прорезей создает магнитное поле, которое двигает контрагированную дугу по окружности. Для улучшения условий горения и перемещения дуги на торце припаивается накладка из дугостойкого материала типа медь-хром, которая позволяет существенно повысить эрозионную стойкость электродной системы в целом.

Значительно меньшая эрозия электродов наблюдается, если в зоне развития дуги организовать продольное магнитное поле. Продольное магнитное поле в зоне горения дуги препятствует контрагированию дуги до токов порядка 50 кА. Конструкция электродов вакуумного разрядника с продольным магнитным полем приведена на рис. 1, *д*. В данном случае продольное магнитное поле в зоне горения дуги создается за счет разветвления основного ток разрядника на четыре параллельные ветви направленные вдоль поверхности электрода. Электрод-накладка, на поверхности которого горит дуга, имеет прорези, препятствующие протеканию круговых токов.

Конструктивная схема электродов стержневого типа, предложенная в [2, 3], приведена на рис. 1, *е*. Такая система электродов поддерживает дугу в диффузном виде в широком диапазоне токов, причем активная площадь электродов, на которой горит дуга увеличивается по сравнению с другими приведенными геометриями при одинаковом объеме камеры разрядника. Дополнительное достоинство этой конструкции электродов заключается в том, что индуктивность при такой конфигурации, по-видимому, наименьшая из всех приведенных, за счет диффузной формы дуги и симметрии системы электроды-дуга относительно оси разрядника на всех стадиях горения дуги.

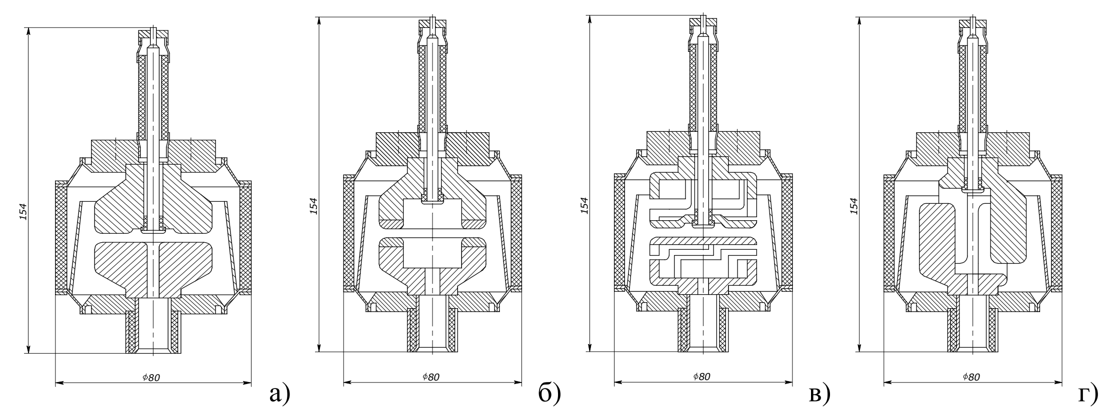


Рис. 2. *Конструктивные схемы испытанных макетов разрядников. Электроды по: а) рис. 1, а,б; б) рис. 1, в,г; в) рис. 1, д; г) рис. 1, е*

Сравнительные испытания всех приведенных выше геометрий электродных узлов проводились в одинаковых условиях. По серийной технологии вакуумного производства, были изготовлены макетные образцы вакуумных разрядников в керамических корпусах наружным диаметром 80 мм. Конструкции некоторых макетов разрядников с испытуемыми электродами приведены на рис. 2.

Для формирования импульса тока была использована конденсаторная батарея с общей емкостью 1200 мкФ на базе конденсаторов ИС-5-200. Импульс коммутируемого тока имел форму затухающей синусоиды с периодом 640 мкс, декрементом затухания 1,8, амплитудой 55 кА при зарядном напряжении 6,6 кВ. Для формирования указанной длительности периода колебаний тока последовательно с конденсаторной батареей включалась индуктивность. Общая индуктивность контура, измеренная методом короткого замыкания, составила 8,4 мкГн. Экспериментальные разрядники запускались от блока управления, состоящего из конденсатора емкостью 1,5 мкФ, который заряжался до амплитуды 7 кВ и разряжался на узел поджига через воздушный коммутатор. Для обеспечения симметрии магнитного поля в области установки испытуемого разрядника, он помещался в коаксиальную систему токоподвода. Конструктивная схема испытательного поля приведена на рис. 3. Для обеспечения идентичности результатов все разрядники испытывались по одной методике: перед циклом испытаний измерялось сопротивление между основными электродами и между электродами узла поджига, проводились высоковольтные испытания до и после цикла испытаний, коммутационные испытания проводились до отказа в срабатывании разрядника.

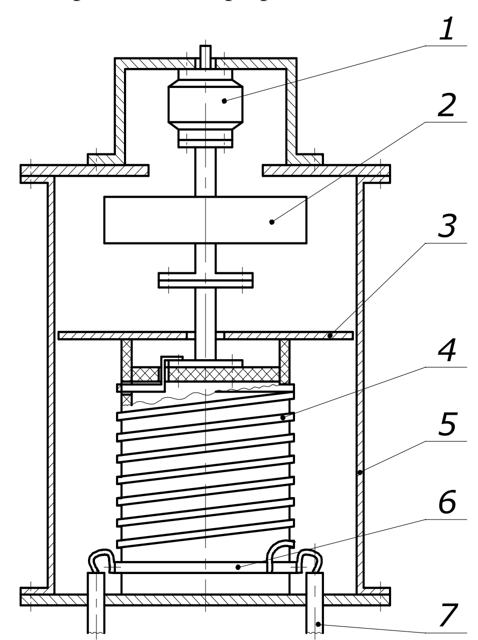


Рис. 3. *Конструктивная схема испытательного поля макетов разрядников: 1) испытуемый разрядник, 2) пояс Роговского, 3) экран, 4) катушка индуктивности, 5) металлический корпус, 6) коллектор, 7) высоковольтный кабель от конденсаторной батареи*

В процессе испытаний периодически происходило закорачивание электродов узла поджига разрядников продуктами эрозии. При этом сопротивление между электродами узла поджига становилось близким к нулю, и он переставал срабатывать при подаче импульса управления. Для восстановления работоспособности разрядника в таких случаях использовали разряд конденсатора ИС-5-200, заряженного до напряжения 4 кВ на электроды узла поджига. После разряда сопротивление между электродами становилось 50...200 кОм. Испытания продолжались до тех пор, пока разрядник не переставал срабатывать или не начинал пробиваться на зарядном напряжении.

Результаты по эрозии электродов различной геометрии приведены в таблице.

Таблица. *Результаты испытания разрядников с различной конфигурацией электродов*

Тип электродов по рис. 1	Количество срабатываний без отказов	Пропущенное количество электричества до отказа, Кл	Состояние электродов при осмотре после вскрытия разрядника
а	5–8	143...229	Глубокие следы эрозии на катоде и аноде. Сильное запыление узла поджига.
б	15–18	429...515	Глубокие следы эрозии на катоде и аноде. Сильное запыление узла поджига.
в	80–88	2288...2517	Расплавление выступов, заплавление пазов. Запылен узел поджига.
г	130–140	3720...4000	Накладка имеет плавные возвышенности, глубоких следов эрозии нет. Запылен узел поджига.
д	170–180	4860...5150	Заплавление прорезей на торцевых накладках. Запылен узел поджига.
е	4500	145000	Незначительная эрозия "стержней". Запылен узел поджига.

После испытаний корпус разрядника вскрывался, и производился осмотр внутренних элементов. Электроды разрядника торцевого и лепесткового типа после наработки до отказа имели примерно одинаковый вид: глубокие следы эрозии обоих электродов, капли металла на экране, поджигающий электрод залит металлом, пусковой промежуток закорочен крупными каплями металла.

Чашеобразные электроды без накладки после наработки до отказа были значительно эрозированы (рис. 4). Расплавленный металл залил торцевые пазы катодного и анодного электродов. На торце поджигающего электрода, как и на всей прилегающей поверхности, была различима пленка меди с каплями высотой ~1 мм, диаметром ~0,5 мм. Поверхность экрана, обращенная к электродам, имеет равномерное покрытие металлом электродов. Ширина покрытия примерно 20 мм. Остальная поверхность экрана покрыта каплями размером от 0,1 до 1 мм. Внутренняя поверхность керамического



Рис. 4. *Состояние элементов разрядника с электродами по рис. 1, в*

корпуса запылилась на ширину 15...20 мм со стороны управляющего электрода (рис. 2). Остальная поверхность керамики чистая, без видимых следов напыления.

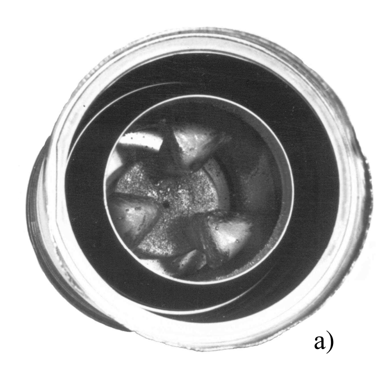
Чашеобразные электроды с накладкой из композиции медь-хром имеют значительно больший ресурс по сравнению с чашеобразными электродами без накладки. Отказы наступали в основном только по причине закорачивания электродов узла поджига. На рис. 5 представлен общий вид элементов разрядника после наступления отказа из-за разгерметизации шва между керамическим корпусом и фланцем, на котором был установлен электрод без узла поджига. Существенных разрушений основных электродов разрядника не произошло. Следует отметить наличие наплывов от 0,5 до 2 мм на внутренней и внешней сторонах накладок на обоих электродах. В зоне узла поджига наблюдается значительное количество напыления, которое и привело к замыканию диэлектрического промежутка узла поджига, который находился со стороны катода. На поверхности экрана видна равномерно распыленная пленка матового стального цвета. На внутренней поверхности керамического корпуса образовалась запыленная полоса со стороны узла поджига шириной около 25 мм.

Скорость эрозии электродов, создающих продольное магнитное поле в области горения дуги (рис. 1, *д*), значительно меньше, чем электродов чашеобразного вида (рис. 1, *г*). Отказ в работе разрядника, конструкции рис. 2, *в*, произошел по причине пробоя основного промежутка анод-катод при напряжении около 4 кВ. При осмотре внутренней полости разрядника оказалось, что пробой возник из-за заплавления одного из пазов на поверхности электрода и появлением острого выступа. В остальном картина на узле поджига и керамике корпуса аналогична наблюдаемой для разрядника с чашеобразными электродами с накладкой (рис. 5).

Макет разрядника со стержневыми электродами выдержал около 4500 циклов в условиях, одинаковых с разрядниками всех остальных типов, причем стержневые электроды были изготовлены из меди вакуумной плавки. При этом он пропустил суммарное количество электричества 145 кКл. В процессе испытаний наблюдалось 7 отказов в рабо-



Рис. 5. *Состояние элементов разрядника с электродами по рис. 1, г*





а) б)

Рис. 6. *Состояние элементов разрядника с электродами по рис. 1, е: а) корпус, экран и основные электроды без узла поджига; б) основные электроды с узлом поджига*

те по причине закорачивания электродов узла поджига. Работоспособность разрядника восстанавливалась описанным выше способом. Вскрытие и осмотр внутренних узлов разрядника показали вполне удовлетворительное состояние основных узлов. Состояние элементов разрядника после испытаний приведено на рис. 6. В узле поджига наблюдалось равномерное напыление продуктов эрозии на керамику. Состояние керамики корпуса было аналогично керамике разрядника с чашеобразными электродами с накладкой: запыленная полоса со стороны узла поджига шириной около 25 мм.

Дополнительно все типы приведенных конструкций электродов (кроме конструкции рис. 1, *е*), были испытаны в режиме коммутации тока амплитудой 10 кА. Все разрядники выдержали по $5 \cdot 10^3$ срабатываний. Причем у всех типов разрядников запыление узла поджига было незначительно, основные электроды не содержали глубоких следов эрозии, структура поверхности имела небольшую шероховатость матового цвета. Это говорит о том, что при токах порядка 10 кА разряд носит диффузный характер независимо от конфигурации электродов и магнитного поля в зоне горения разряда.

Выводы

1. Экспериментально подтверждено, что для вакуумных разрядников конфигурация электродов при токе более 10 кА существенно влияет на эрозию электродов и ресурс разрядника.
2. Для вакуумных разрядников экспериментально доказано преимущество стержневых электродов перед электродами торцевой, лепестковой и чашеобразной конфигураций.
3. Во всех испытанных конструкциях наименее надежным элементом разрядника оказался узел поджига, который запылялся продуктами эрозии основных электродов, закорачивая между собой управляющие электроды.
4. Полученные данные могут служить основой для разработки вакуумных разрядников отпаянной конструкции серийного производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вакуумные дуги: Пер. с англ. / Под ред. Дж. Лафферти. – М.: Мир, 1982. – 432 с.
2. А.с. 1644271 СССР. МКИ H01T 1/00. Вакуумный разрядник / В.А. Воздвиженский, В.А. Сидоров, В.А. Лавринович, А.А. Демидов. Заявлено 22.02.1988; Опубл. 23.04.1991, Бюл. № 15.
3. А.с. 1701087 СССР. МКИ H01T 2/02. Вакуумный разрядник / В.А. Воздвиженский, В.А. Сидоров, В.А. Лавринович, А.А. Демидов. Заявлено 20.10.1988; Опубл. 20.09.1991, Бюл. № 17.